รายงานผลการดำเนินงานฉบับย่อ

โครงการ “ระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง”

“Spectrum monitoring system and displaying with the Augmented Reality (AR) technology”

ผศ.ดร.อานุภาพ บุญส่งศรีกุล[1]

รศ.ดร.นรรัตน์ วัฒนมงคล[1]

ผศ.ดร.กฤษณะ ชินสาร[1]

ดร.ประจักษ์ จิตเงินมะดัน[1]

ผศ.ดร.อจลวิชญ์ ฉันทวีโรจน์[2]

ดร.จักรกฤช ตรรกพาณิชย์[3]

Asst. Prof. Anuparp Boonsongsrikul Ph.D[1]

Assoc. Prof. Norrarat Wattanmongkhol Ph.D[1]

Asst. Prof. Krisana Chinnasarn Ph.D[1]

Prajaks Jitngernmadan Ph.D[1]

Asst. Prof. Ajalawit Chantaveerod Ph.D[2]

Jukkrit Tagapanij Ph.D[3]

มหาวิทยาลัยบูรพา[1]

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์[2]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร[3]

Burapha University[1]

Walailak University[2]

Mahanakorn University of Technology[3]

ชื่อเรื่องภาษาไทย ระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง .

Title Spectrum monitoring system and displaying with the Augmented Reality (AR)

บทคัดย่อ

การวางแผนคลื่นความถี่ การกำหนดและการจัดสรรคลื่นความถี่อาจจะไม่สามารถเป็นหลักประกันได้ว่าจะมีการใช้งานคลื่นความถี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด การตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่เป็นเครื่องมืออันสำคัญที่จะช่วยสนับสนุนภารกิจในการบริหารการใช้งานคลื่นความถี่โดยจะเป็นเครื่องมือที่ใช้รวบรวมข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ตามจริงของช่องสัญญาณและแถบความถี่ที่ได้รับการจัดสรร บทความนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบสำหรับระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง ประกอบด้วยชุดตรวจจับกำลังสัญญาณใช้เซนเซอร์ HACK RF พร้อมสายอากาศแบบมีทิศทางย่านวัด 850 MHz – 2500 MHz ค่าที่เซนเซอร์อ่านได้จะถูกประมวลผลด้วย Raspberry Pi เพื่อส่งกำลังสัญญาณสู่คลาวด์เซริฟเวอร์ แอพลิเคชั่น AR Cellular NBTC ถูกออกแบบขึ้นเพื่อแสดงผลค่ากำลังสัญญาณในรูปแบบ AR ผลการทดลองการวัดสัญญาณด้วยเซนเซอร์ที่ออกแบบจำนวน 4 จุดคือ 100 เมตร 200 เมตร 300 เมตร และ 400 เมตรห่างจากสถานีฐานมีลักษณะกำลังสัญญานที่มีทิศทางเดียวกับเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่ยี่ห้อ Narda IDA โดยสถานีวัดทั้งหมดมี 9 สถานี ในจังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดชลบุรี และ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ผลการวิจัยได้เผยแพร่โดยมีผู้เข้าร่วมอบรมจำนวน 154 คน และผู้ประเมินผลการใช้แอพลิเคชัน AR Cellular NBTC จำนวน 50 คน ค่าเฉลี่ยผลการประเมินอยู่ในเกณฑ์ดีและมีรายละเอียดอยู่ในรายงานฉบับสมบูรณ์

คำสำคัญ : การเฝ้าระวังคลื่นความถี่ การแสดงผลมิติเสมือนจริง การใช้งานคลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ

Abstract

Planning and managing frequency allocation is a quality management issue. To earn the most effective results of this task, one has to monitor the behavior of the frequency constantly. A powerful monitoring tool will help capturing important information such as real usage of approved frequency channels and frequency bands. This work aimed to present an approach of designing a spectrum monitoring system and representation based on Augmented Reality (AR). The system consists of a set of signal monitoring using HackRF equipped with an antenna that can pick up frequency length of 850 – 2,500 MHz. A raspberry Pi is used for data collection and transferring to a cloud platform. The AR Cellular NBTC is an AR application that is designed and developed to represent the frequency in AR manner. The measurement of signal strength is done at 100 meters, 200 meters, 300 meters, and 400 meters away from a base station. For accuracy purpose, the Narda IDA is used for comparison. The total 9 base stations are in Nakorn Sri Thammarat, Chon Buri, and Bangkok. The results of this work are published. The total number of participants is 50. The usefulness of the AR Cellular NBTC application is measured among 50 participants. The average value of the evaluation suggests the good result. The entire details of this work are in the final report.

Keywords: Spectrum Monitoring, Augmented Reality, Efficiency Bandwidth Utilization

1. บทนำ

คลื่นความถี่ถือเป็นทรัพยากรการสื่อสารของชาติที่มีคุณค่าและมีประโยชน์มหาศาลต่อมนุษย์ทุกคน เพราะคลื่นความถี่เป็นทรัพยากรระหว่างประเทศที่มีอยู่ทุกหนทุกแห่ง มิใช่เป็นของรัฐใดรัฐหนึ่งโดยเฉพาะแต่ภายใต้หลักอำนาจอธิปไตยของรัฐแล้ว รัฐแต่ละรัฐมีสิทธิในการดำเนินการเกี่ยวกับคลื่นความถี่ ตราบเท่าที่การกระทำนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้คลื่นความถี่ของรัฐอื่น ๆ และรัฐนั้น ๆ ได้ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ของอนุสัญญาแห่งสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union : ITU) ที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นการบริหารจัดการคลื่นความถี่จำเป็นต้องวางแผน จัดสรร และการกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อประเทศชาติและประชาชนให้ปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกัน (Interference) ในการบริหารจัดการเพื่อให้เกิดการแข่งขันที่เสรีและเป็นธรรม ได้เปลี่ยนจากระบบสัมปทาน (Concession) ไปสู่ระบบใบอนุญาต (Licensing) เพื่อให้ประเทศชาติและประชาชนได้รับประโยชน์สูงสุด การพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีโทรคมนาคม กระจายเสียง และโทรทัศน์ได้สร้างโอกาสในการเข้าถึงช่องทางในการติดต่อสื่อสารและรับข้อมูลข่าวสารให้กับประชาชนทุกกลุ่มและทุกพื้นที่ในประเทศไทย การเจริญเติบโตของการใช้งานดังกล่าวได้สร้างความต้องการในการใช้งานคลื่นความถี่เพิ่มมากขึ้นอย่างไม่

เคยเป็นมาก่อน ถึงแม้ว่าคลื่นความถี่เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่มีวันหมดสิ้น แต่มีความจำเป็นที่จะต้องมีการบริหารจัดการเพื่อให้มีการใช้งานคลื่นความถี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตามพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่และกำกับการประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2560 บัญญัติให้คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) มีอำนาจหน้าที่ในการจัดทำแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่ ตารางคลื่นความถี่แห่งชาติ แผนแม่บทกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ แผนแม่บทกิจการโทรคมนาคม แผนความถี่วิทยุและแผนเลขหมายโทรคมนาคมและดำเนินการให้เป็นไปตามแผนดังกล่าว ตลอดจนพิจารณาอนุญาตและกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่และเครื่องวิทยุคมนาคมในการประกอบกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจโทรคมนาคม รวมทั้งกำหนดหลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกันทั้งในกิจการประเภทเดียวกันและระหว่างกิจการแต่ละประเภท วินิจฉัยและแก้ไขปัญหาการใช้คลื่นความถี่ที่มีการรบกวนซึ่งกันและกัน

การวางแผนคลื่นความถี่โดยอาศัยทฤษฎี เช่น การกำหนดและการจัดสรรคลื่นความถี่อาจจะไม่สามารถเป็นหลักประกันได้ว่าจะมีการใช้งานคลื่นความถี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากเป็นการวางแผนที่ปราศจากข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ตามจริงและผู้วางแผนบริหารคลื่นความถี่จะไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าคลื่นความถี่ที่ได้รับจัดสรรไปมีการใช้งานจริงหรือไม่ การตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (spectrum monitoring) เป็นเครื่องมืออันสำคัญที่จะช่วยสนับสนุนภารกิจในการบริหารการใช้งานคลื่นความถี่โดยจะเป็นเครื่องมือที่ใช้รวบรวมข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ตามจริงของช่องสัญญาณและแถบความถี่ที่ได้รับการจัดสรร ข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วยสถิติการใช้งานคลื่นความถี่ และประสิทธิภาพของการใช้งานคลื่นความถี่ นอกจากนี้ การตรวจสอบเฝ้าฟังจะเป็นเครื่องมืออันสำคัญของกระบวนการกำกับดูแลและบังคับใช้ (regulation and enforcement) หรือสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องส่งที่เพิ่งได้รับอนุญาตก่อนนำไปใช้ การตรวจสอบหาเครื่องส่งที่ออกอากาศโดยไม่ได้รับอนุญาตและการรวบรวมข้อมูลเพื่อแก้ปัญหาการรบกวน นอกจากนั้นแล้ว ยังมีประเด็นอื่นอีกที่สำคัญคือการสร้างความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องให้กับประชาชนในเรื่องผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการติดตั้งเสาสัญญาณโทรศัพท์ใกล้แหล่งชุมชน โรงเรียน และที่พักอาศัย มีนักวิชาการอิสระบางกลุ่มได้กล่าวว่าปัญหาทางสุขภาพที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากเสาสัญญาณ โทรศัพท์ เกิดขึ้นจริง โดยผู้ที่อาศัยอยู่ใกล้เสาและบริเวณใกล้เคียง จะมีอาการอ่อนเพลีย ปวดศีรษะ วิงเวียนนอนไม่หลับ ความจำเสื่อม รวมถึงโรคมะเร็งตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ปัจจุบันประชาชนจึงให้ความสำคัญและมีความวิตกกังวลเรื่องนี้เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องหาทางออกร่วมกันในการหามาตรการลดความเสี่ยงและให้เครื่องมือหรือความรู้ที่ถูกต้องในการพิจารณาตรวจสอบเพื่อการปฏิบัติติตนได้เหมาะสมในเบื้องต้น

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไปอย่างรวดเร็วและความต้องการใช้งานคลื่นความถี่สำหรับสมาร์ทโฟนมีแนวโน้มสูงขึ้นมาก เพื่อให้เกิดความมั่นใจที่จะมีคลื่นความถี่ไว้ใช้งานในอนาคตและเตรียมความพร้อมในการรองรับการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารสมัยใหม่จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือ บุคลากร และ

ระบบสารสนเทศต่าง ๆ ในการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ที่รองรับตามห่วงโซ่การบริหารจัดการคลื่นความถี่ โดยในส่วนของเครื่องมือตรวจสอบความถี่ซึ่งใช้ในการติดตามการใช้คลื่นสำหรับกิจการวิทยุคมนาคม กิจการด้านกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม ซึ่งเป็นเครื่องมือเฉพาะทางที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และมีมูลค่าสูง และในการปฏิบัติงานจริง เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจสอบดังกล่าวจำเป็นต้องมีทักษะเฉพาะทาง และมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้และระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การเรียนรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์เครื่องมือการตรวจสอบความถี่ การศึกษาการใช้งาน การถ่ายทอดองค์ความรู้ หรือการแลกเปลี่ยนประสบการณ์การทำงานระหว่างเจ้าหน้าที่ตรวจสอบคลื่นความถี่รุ่นเก่าและรุ่นใหม่จึงจำเป็นต้องมีการวางแนวทางการพัฒนาที่เป็นระบบ รวมถึงการสร้างการรับรู้ให้แก่บุคคลทั่วไป นักเรียน นักศึกษา และบุคลากรในสายวิชาชีพอื่นให้มีความเข้าใจระบบการตรวจสอบคลื่นความถี่ตามกระบวนการและขั้นตอนที่เป็นไปตามมาตรฐานสากล

2. การทบทวนวรรณกรรม

M. Höyhtyä (2016) ได้นำเสนอกลวิธีการวัดคลื่นความถี่เพื่อดูการถือครอง การใช้งานคลื่นความถี่ว่ามีประสิทธิมากน้อยอย่างไร โดยกลวิธีต่าง ๆ ที่ครอบคลุมครอบคลุม 3 มิติ ได้แก่ มิติความถี่ มิติเวลา และมิติตำแหน่ง งานวิจัยของ Dezhang Chen (2012) ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ได้รายงานการวัดการครอบครองคลื่นความถี่ช่วง 20 - 3000 MHz มีชุดตรวจสอบคลื่นวิทยุจำนวน 150 แห่งในมณฑลยูนนาน โดยระบุจุดวัดสถานีกลางแห่งหนึ่งในช่วงเวลา 1:00 ถึง 23:00 น.ของวันที่ 2-4 เมษายน พ.ศ 2555 งานวิจัยของ Chang-joo Kim (2008) ประเทศสาธารณรัฐเกาหลีใต้ ได้รายงาน นโยบายและเทคโนโลยีของการเข้าถึงช่องสัญญาณความถี่แบบพลวัตในเกาหลีด้วยเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง และวิทยุที่กำหนดค่าความถี่ใหม่ได้ งานวิจัยของ P. Karimi (2018) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เสนอสถาปัตยกรรมแบบกระจายและปรับขยายได้สำหรับการจัดการสเปคตรัมแบบไดนามิก ผลการวิจัยของทั้ง 3 ประเทศสะท้อนปัญหาประสิทธิภาพการจัดสรรคลื่นความถี่แบบกำหนดตายตัว และเสนอแนวคิดการจัดสรรคลื่นแบบพลวัต

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

3.1 เพื่อศึกษาแนวทางการดำเนินงานของระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ของต่างประเทศ และการนำนวัตกรรมเทคโนโลยีใหม่มาใช้เพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถของระบบตรวจสอบคลื่นความถี่

3.2 เพื่อให้มีระบบนำร่องที่ประยุกต์ใช้นวัตกรรมใหม่ เช่น Augmented Reality (AR) มาใช้ร่วมกับการตรวจสอบคลื่นความถี่

3.3เพื่อให้มีสื่อการเรียนรู้เกี่ยวกับระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ รวมถึงรายละเอียดของเครื่องมือตรวจสอบคลื่นความถี่เพื่อสื่อสารทำความเข้าใจและถ่ายทอดความรู้ให้แก่ประชาชน นักเรียน นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป

4. วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยประกอบด้วย 1) คำถามการวิจัย 2) จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย 3) แนวคิดทฤษฎีที่จะใช้เป็นกรอบในการค้นคว้าวิจัย 4) วิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการทำวิจัย และ 5) ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ

4.1 คำถามวิจัย เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของระบบตรวจสอบคลื่นความถี่อันประกอบด้วยหน่วยงานของรัฐที่วางแผนและกำกับดูแลคลื่นความถี่ภายในประเทศ ผู้ประกอบการที่ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์คลื่น 4G ประชาชน นักเรียน นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ดังนั้นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียดังกล่าวต้องมีส่วนร่วมในกระบวนการวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประเมินผลงานเพื่อฟังเสียงสะท้อนและนำมาปรับปรุงผลงานในลำดับถัดไป

4.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อให้สามารถวัดความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3 ตัวชี้วัดผลผลิตจำนวน 3 ข้อ และตัวชี้วัดผลลัพธ์จำนวน 4 ข้อจึงถูกกำหนดขึ้นดังนี้

ตัวชี้วัดผลผลิตข้อ 1 คือรายงานวิเคราะห์และอภิปรายแนวทางการดำเนินงานของระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ของต่างประเทศอย่างน้อย 2 ประเทศ และเสนอแนวทางการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สามารถนำมาประยุกต์เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ให้เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยในปัจจุบัน ตัวชี้วัดผลผลิตข้อ 2 คือ ได้ต้นแบบเครื่องตรวจสอบความถี่แบบพกพาจำนวน 5 ชุด ที่นำเอาเทคโนโลยี AR มาประยุกต์เพื่อใช้แสดงผลที่ได้จากการตรวจจับคลื่นความถี่แบบเสมือนจริง แบบใช้ควบคู่กับเครื่องหมายระบุตำแหน่ง (Marker-Based: AR) และแบบหมุนได้รอบทิศทาง (Panoramic 360 AR) และ ตัวชี้วัดผลผลิตข้อ 3. สื่อการเรียนรู้เกี่ยวกับระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ รวมถึงรายละเอียดของเครื่องมือตรวจสอบคลื่นความถี่เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นรู้กับประชาชน นักเรียน นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป

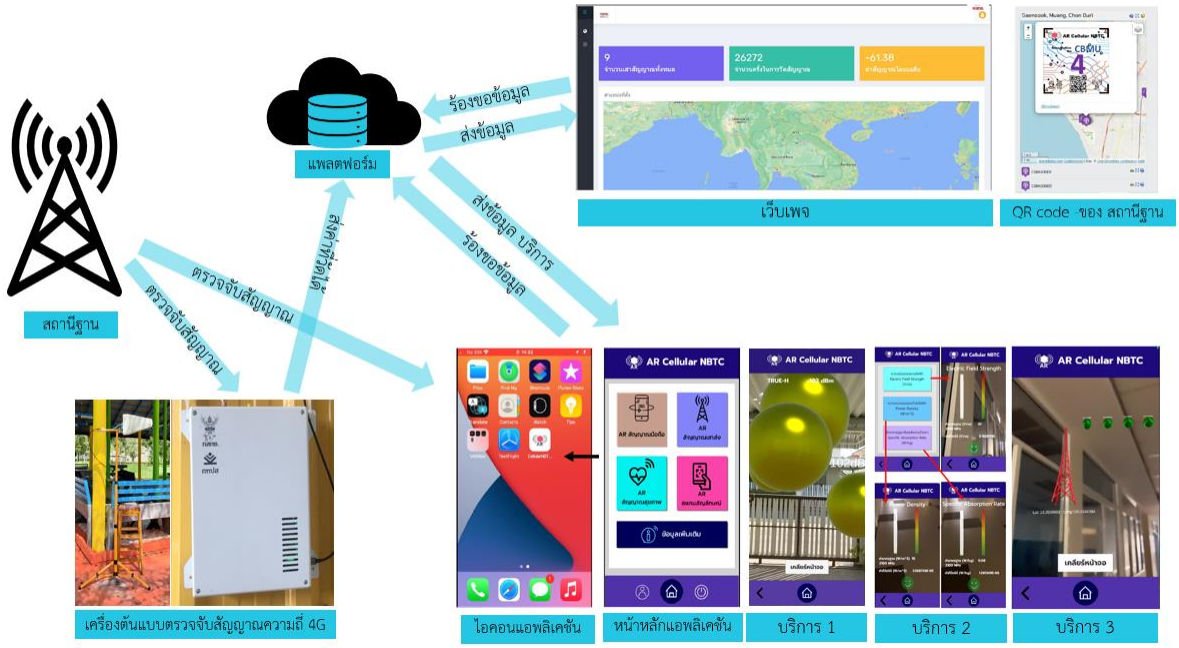
ตัวชี้วัดผลลัพธ์ข้อ 1 คือ กสทช. จะได้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ ระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ที่ใช้เทคโนโลยี AR ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาและใช้งานในการตรวจสอบการใช้งานแบนด์วิทด์ของผู้ประกอบการที่ใช้งานความถี่ในประเทศไทยได้ นำไปสู่การบริหารจัดการใช้งานความถี่ได้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ตัวชี้วัดผลลัพธ์ข้อ 2 คือ เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจสอบมีความรู้ความเข้าใจและมีทักษะในการใช้งานระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ รวมถึงพัฒนาบุคลากรให้มีความคิดในการพัฒนานวัตกรรมได้ด้วยตนเอง ตัวชี้วัดผลลัพธ์ข้อ 3 คือหน่วยงานของรัฐ ภาคประชาสังคม และประชาชนทั่วไป จะได้รับการเผยแพร่ข้อมูลรายงานโครงการนี้ เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้อง และ ตัวชี้วัดผลลัพธ์ข้อ 4 คือเจ้าหน้าที่ของรัฐและประชาชนทั่วไปได้เข้าร่วมการอบรมสัมมนาเชิงปฏิบัติการ จำนวน 120 คน เรื่องการใช้งานอุปกรณ์ตรวจสอบความถี่ที่พัฒนาจากโครงการวิจัย การตรวจสอบความถี่จากสมาร์ทโฟนด้วยตัวเอง และสามารถประเมินผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเสาปล่อยสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ในเบื้องต้น

4.3 แนวคิดทฤษฎีที่จะใช้เป็นกรอบในการค้นคว้าวิจัย แนวคิดทฤษฎีที่ใช้เป็นกรอบการในการวิจัยถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ตรวจวัดสัญญาณคลื่น 4G ประกอบด้วย ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในแบบที่โล่ง (Line of Sight: LOS) และในบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางการเดินทางของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Non Line of Sight: NLOS) จากสถานีส่งสัญญาณ ทฤษฎี

สายอากาศที่รับสัญญาณแบบมีทิศทางและแบบรอบทิศทาง เทคโนโลยีการตรวจวัดคลื่นวิทยุที่กำหนดค่าความถี่ด้วยโปรแกรม (Software Defined Radio: SDR) ส่วนที่ 2 เทคโนโลยีและโปรแกรมภาษาคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบคราวด์เซิร์ฟเวอร์ประกอบด้วย เว็บเฟรมเวิร์ค แบบ Flask Framework ที่มีภาษาไพทอนเป็นฐาน และการสร้าง API สำหรับการบริการอุปกรณ์ที่ร้องขอ ส่วนที่ 3 เทคโนโลยีสารสนเทศและดิจิทัลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนที่แสดงผลคลื่นความถี่แบบ AR โดยการออกแบบและพัฒนานั้น ต้องมีการออกแบบวัตถุ 3D เพื่อซ้อนทับภาพจริง การออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android และ iOS และการออกแบบให้รองรับการทำงานของ AR ทั้งในรูปแบบ Panoramic 360 และ Marker-based AR

4.4 วิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการทำวิจัย

วิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการทำวิจัยเริ่มด้วยการคิดภาพรวมการทำงานทั้งหมดและแบ่งองค์ประกอบระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง โดยแตกองค์ประกอบออกมาเพื่อนำไปศึกษาและออกแบบในแต่ละส่วนได้ดั้งนี้ 1) ผลการศึกษาและการออกแบบชุดตรวจวัดสัญญาณคลื่นความถี่ HACK RF 2) การออกแบบแพลตฟอร์มฐานข้อมูลเชื่อมต่อการแสดงผล และ 3) การออกแบบการแสดงผลบนสมาร์ทโฟนระบบ Android/iOS ภาพรวมวิธีการและเทคนิคที่ใช้ในระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริงแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการและเทคนิคสำหรับระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง

4.4.1 ผลการศึกษาและการออกแบบชุดตรวจวัดสัญญาณคลื่นความถี่ HACK RF

(ก) ผลการศึกษาและออกแบบกลวิธีกระบวนการวัด

การเลือกใช้กลวิธีการวัดที่แตกต่างกันจะให้ผลการวัดที่ไม่เหมือนกัน จึงจำเป็นต้องออกแบบกลวิธีการวัดให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวัด โครงการนี้มุ่งออกแบบกลวิธีการวัดเพื่อให้ได้ข้อมูลระดับกำลังคลื่นวิทยุที่เหมาะสมกับการพิจารณาระดับความปลอดภัยต่อมนุษย์ที่อาศัยบริเวณใกล้กับสถานีฐาน และเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการแสดงผลของระบบ AR กลวิธีการวัดที่ออกแบบขึ้นนั้น เป็นไปตามหลักของ “Electro-Space” ซึ่งครอบคลุม 3 มิติ ได้แก่ มิติความถี่ มิติเวลา และมิติตำแหน่ง การประยุกต์ใช้กลวิธีการวัดในเชิงปฏิบัติ เป็นปัจจัยหลักที่จำเป็นต้องถ่วงน้ำหนักระหว่างระดับความแม่นยำของระดับสัญญาณที่วัดได้และระยะเวลาในการตรวจวัดที่ครอบคลุมทั้งย่านความถี่ที่ใช้งาน ด้วยเหตุนี้ โครงการนี้จึงศึกษาและออกแบบกลวิธีการวัด ทำให้ได้รับกลวิธีการวัดที่สามารถวัดระดับสัญญาณในช่วงความถี่ย่อยเท่ากับ 5 MHz จำนวน 36 ช่วงความถี่ย่อย ครอบคลุมในย่าน 850 900 1800 และ 2100 MHz โดยวัดและจัดเก็บข้อมูลบนคลาวด์แบบอัตโนมัติในระยะเวลาประมาณ 50 นาที การใช้กลวิธีวิธีนี้จะช่วยให้เฝ้าระดับสัญญาณได้จำนวนมากกว่า 10 รอบต่อหนึ่งวัน จึงเลือกเฝ้าวัดในช่วง 0900-2100 น. ยิ่งไปกว่านั้น โครงการนี้ พบว่า กลวิธีนี้สามารถใช้งานได้กับกรณีที่มีจุดสุ่มวัดระดับสัญญาณหลายจุดพร้อมกัน ซึ่งโครงการนี้เลือกสุ่มวัดจำนวน 4 จุด ภายในระยะรัศมีจากสถานีฐาน 100 200 300 และ 400 เมตร

(ข) ผลการศึกษาและออกแบบเครื่องต้นแบบระบบตรวจสอบคลื่นความถี่โดยเทคโนโลยี SDR

หลังจากได้รับกลวิธีการวัดแล้ว โครงการนี้จึงใช้เป็นเกณฑ์การกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องต้นแบบระบบตรวจสอบคลื่นความถี่โดยใช้เทคโนโลยี SDR ในปัจจุบันอุปกรณ์วิเคราะห์แถบความถี่แบบ SDR สามารถหาได้ง่ายขึ้น และได้รับการพัฒนาชุดโปรแกรมคำสั่งพื้นฐานที่ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้น โครงการนี้จึงเลือกใช้อุปกรณ์ SDR ที่มีราคาถูก เพื่อนำมาวิจัยและประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์สำหรับใช้ตรวจวัดสัญญาณในช่องความถี่ย่อยๆจำนวนมาก และเพิ่มจำนวนอุปกรณ์เพื่อติดตั้งและเฝ้าวัดไว้หลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน แม้ว่าอุปกรณ์ SDR มีสมรรถนะสูงกว่าโทรศัพท์มือถือ แต่ยังต่ำกว่ามาก เมื่อเทียบกับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ประสิทธิภาพสูง โครงการนี้เลือกใช้คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เพื่อโปรแกรมการทำงานของอุปกรณ์ SDR ให้เฝ้าวัดสัญญาณเป็นไปตามกลวิธีการวัดที่สร้างขึ้น และเพื่อประมวลผลขั้นต้นให้ข้อมูลการวัดมีจำนวนลดลง และเพื่อจัดส่งข้อมูลไปเก็บไว้ในระบบคลาวน์ที่เชื่อมต่อกับระบบแสดงผล AR ผลการใช้งานเครื่องต้นแบบระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ ทำให้พบว่า เครื่องต้นแบบตรวจจับคลื่น 4G สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตลอดการเฝ้าวัดสัญญาณจำนวน 10 วัน และผลการวัดที่ได้สอดคล้องกับผลการสุ่มวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ประสิทธิภาพสูง

4.4.2 การออกแบบแพลตฟอร์มสำหรับฐานข้อมูลเชื่อมต่อการแสดงผล

การออกแบบแพลตฟอร์มระบบฐานข้อมูลถูกจัดทำขึ้นเพื่อเป็นตัวกลางที่เชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์สมาร์ทโฟน รวมทั้งผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้อง เมื่อข้อมูลที่วัดได้จากเซนเซอร์ส่งเข้ามายังฐานข้อมูล จะถูกประมวลผลให้เป็นค่ากำลังของสัญญาณ (RSSI) และสัญญาณสุขภาพ เมื่อมีการร้องขอบริการเอพีไอ (API Service) จากแอพลิเคชัน AR Cellular NBTC ระบบจะทำการดึงข้อมูลมาตามบริการ (Service) โดยที่ บริการ 1 (Service

1) และ บริการ 2 (Service 2) คือ การร้องขอ RSSI และ สัญญานสุขภาพ ตามลำดับ และ บริการ 3 (Service 3) เป็นการร้องขอค่า RSSI ของสถานีฐานที่แสดงด้วย Marker-based บนหน้าเว็บไซต์ AR Cellular NBTC

4.4.3 การออกแบบการแสดงผลบนสมาร์ทโฟนระบบแอนดรอยด์/ไอโอเอส (Android/iOS)

การแสดงผลการมีอยู่ของสัญญาณคลื่นในรูปแบบ AR นั้น มีการทดลองและนำเสนอในต่างประเทศ รวมถึงการพัฒนาแอปพลิเคชันเฉพาะทาง จากการศึกษาพบว่า มีการแสดงผลในรูปแบบ AR บนอุปกรณ์เฉพาะและบนโทรศัพท์มือถือ ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้การแสดงผลบนโทรศัพท์มือถือ 2 ระบบปฏิบัติการคือ Android และ iOS ซึ่งจากการพัฒนาแอปพลิเคชันให้รองรับทั้งสองระบบนั้นพบว่า การแสดงผลสัญญาณคลื่นในรูปแบบ AR นั้นทำได้ดี ทั้งการแสดงผลในรูปแบบรอบทิศ 360 องศา (Panoramic 360) และแบบมาร์กเกอร์เป็นฐาน (Marker-based AR) โดยใช้ข้อมูลจากแพลตฟอร์มและจากโทรศัพท์มือถือเอง อีกทั้งยังสามารถแสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพของผู้ใช้งาน ได้แก่ ค่าความแรงสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power Density) และค่า อัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate: SAR) ด้วย ทั้งนี้ ยังมีข้อจำกัดในการแสดงผลบางประการในบางระบบปฏิบัติการ ที่ต้องได้รับสิทธิ์ในการเข้าถึงการใช้งานฮาร์ดแวร์จากผู้ผลิตโทรศัพท์มือถือด้วย

4.5 ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ

ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือเริ่มจากการทดสอบการสูญเสียในเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G ซึ่งทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยป้อนกำลังสัญญาณจากตัวกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ไปยัง เครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G และวัดกำลังสัญญาณที่ออกมาจาก เครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เครือข่าย (Network Analyzer) ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาชดเชยในแต่ละไอดี (ID) ของเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G นอกจากนี้ เมื่อนำเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G ไปวัดที่ภาคสนาม ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G จะถูกตรวจสอบโดยใช้คู่เทียบคือเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer: SA)

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) ผลการวัดสัญญาณคลื่นความถี่ที่สถานีฐาน 2) ผลการแสดงคลื่นความถี่แบบ AR และการใช้งานแอพลิเคชัน และ 3) ผลการประเมินการเข้าร่วมโครงการฝึกอบรมการตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง

5.1 ผลการวัดสัญญาณคลื่นความถี่ที่สถานีฐาน

เนื่องจากข้อจำกัดจำนวนหน้า บทความนี้จึงขอนำเสนอการเปรียบเทียบเฉพาะผลการวัดสัญญาณคลื่น 4G ที่สถานีฐานที่ 1 2 และ 3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างระดับสัญญาณที่วัดได้ด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G และ SA สำหรับรายละเอียดผลการวัดคลื่นสัญญาณที่สถานีฐานที่ 4 – 9 สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในรายงานฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบผลของระดับสัญญาณที่วัดได้ด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G และ SA ของสถานีฐานที่ 1 2 และ 3 ที่ย่านความถี่ 800 900 1800 และ 2100 MHz คำจำกัดความในตารางที่ 1

คำว่า “ใช้งาน” หมายถึง มีการใช้งานที่ย่านความถี่ที่กำลังตรวจจับ เช่น 5 out of 5 หมายความว่าเห็นการใช้งานของช่องสัญญาณทั้ง 5 ช่องสัญญาณจากช่องสัญญาณทั้งหมด 5 ช่องสัญญาณ, 2 out of 2 หมายความว่าเห็นช่องสัญญาณทั้ง 2 ช่องสัญญาณจากช่องสัญญาณทั้งหมด 2 ช่องสัญญาณ และ 1 out of 3 เห็นการใช้งาน 1 ช่องสัญญาณ จากช่องสัญญาณทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ

คำว่า “ไม่ใช้งาน” หมายถึง ไม่มีการใช้งานที่ย่านความถี่ที่กำลังตรวจจับ เช่น 0 out of 3 หมายความว่า ไม่เห็นการใช้งานใด ๆ จากช่องสัญญาณทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ และ 0 out of 9 หมายความว่า ไม่เห็นการใช้งานใด ๆ จากช่องสัญญาณทั้งหมด 9 ช่องสัญญาณ เป็นต้น

คำว่า “ใช้งานบางเวลา” หมายถึง มีการใช้งานของช่องสัญญาณบางครั้ง บางเวลา เช่น 4 out of 6 หมายความว่า มีการใช้งานบางเวลาของ 4 ช่องสัญญาณ จากจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมด 6 ช่องสัญญาณ

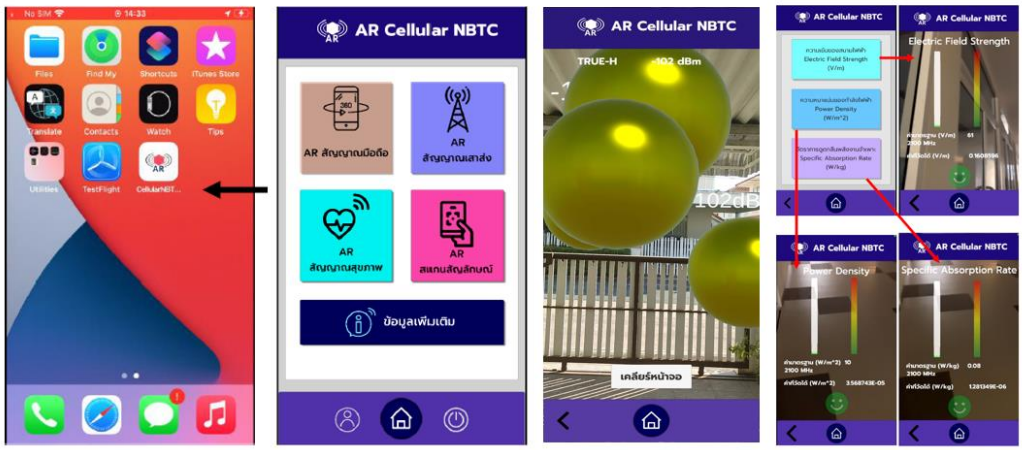
จากผลการวิจัยพบว่าทั้ง เครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G และ SA มีลักษณะการตรวจจับสัญญาณที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คำว่า “ทิศทางเดียวกัน” หมายถึง 1) ระดับของสัญญาณที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นซึ่งวัดได้จากเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G และ SA นอกจากนี้ทิศทางเดียวกัน ยังหมายถึง 2) ระดับของสัญญาณที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 3 dB เมื่อระยะเปลี่ยนไปจากจุดวัดตำแหน่งที่ 100 เมตร ถึง 400 เมตร คำว่าทิศทางเดียวกันในแบบที่ 2 นี้ ค่าที่วัดได้จะมีลักษณะค่อนข้างคงตัว แบนราบ (flat) หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 3 dB เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นจากจุดวัดตำแหน่งที่ 100 เมตร ถึง 400 เมตร

ตารางที่ 1 ผลประเมินการใช้งานแถบความถี่ (Spectrum Occupancy)

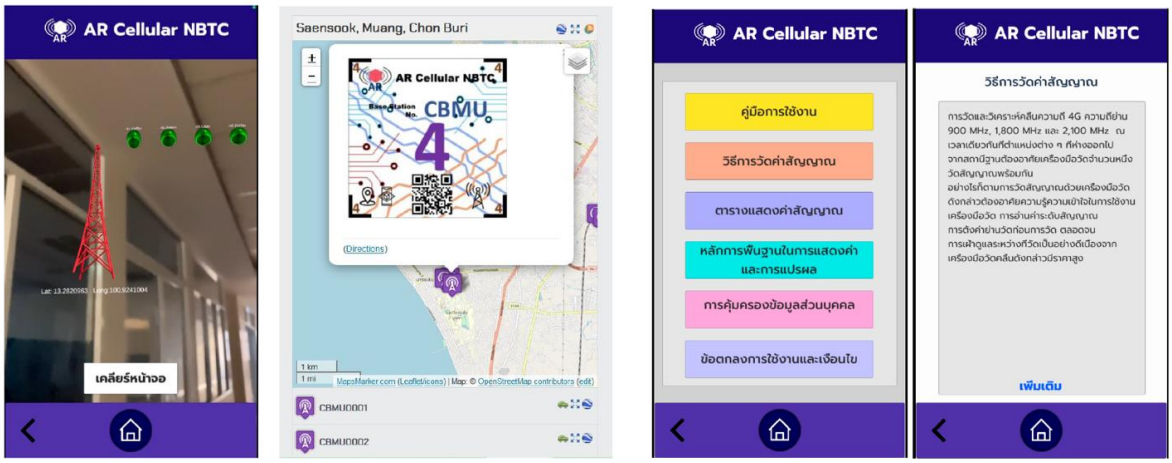
Band	Provider	เครื่อง SA มาตรฐาน	อุปกรณ์ต้นแบบ	ID-Band ที่ใช้งาน	แนวโน้ม
800	TRUE	ใช้งาน	ใช้งาน	5 out of 5	ทิศทางเดียวกัน
900	AIS	ใช้งาน	ใช้งาน	2 out of 2	ทิศทางเดียวกัน
	TRUE	ใช้งาน	ใช้งาน	2 out of 2	ทิศทางเดียวกัน
1800	TRUE	ใช้งาน	ใช้งาน	3 out of 3	ทิศทางเดียวกัน
	AIS	ไม่ใช้งาน	ไม่ใช้งาน	0 out of 3	ทิศทางเดียวกัน
	DTAC	ไม่ใช้งาน	ไม่ใช้งาน	0 out of 9	ทิศทางเดียวกัน
2100	DTAC	ใช้งาน	ใช้งาน	1 out of 3	ทิศทางเดียวกัน
	TRUE	ใช้งาน	ใช้งาน	1 out of 3	ทิศทางเดียวกัน
	AIS	ใช้งาน **บางเวลา**	ใช้งาน **บางเวลา**	4 out of 6	ทิศทางเดียวกัน

5.2 ผลการแสดงคลื่นความถี่แบบ AR และการใช้งานแอพลิเคชัน

การแสดงข้อมูลในมิติของคุณภาพของการบริการในฝั่งที่ผู้ใช้งานสามารถรับข้อมูลและสามารถแสดงผลในรูปแบบ AR บนโทรศัพท์มือถือได้ ซึ่งจะแสดงภาพหน้าจอของแอพพลิเคชัน AR Cellular NBTC ได้ดังต่อไปนี้ ไอคอนของ AR แอพแสดงดังรูปที่ 5(ก) หน้าจอเมนูหลักของแอพดังรูปที่ 5(ข) หน้าจอแสดงการทำงานของเมนู “AR สัญญาณมือถือ” แสดงดังรูปที่ 5(ค) หน้าจอแสดงฟังก์ชันการทำงานของเมนู “AR สัญญาณสุขภาพ” แสดงดังรูปที่ 5(ง) หน้าจอแสดงฟังก์ชันการทำงานของเมนู “AR แสดงสัญญาณเสาส่ง” แสดงดังรูปที่ 5(จ) หน้าเว็บไซต์สำหรับสแกน QR code ของสถานีฐานเพื่อดูกำลังสัญญาณที่วัดได้ แสดงดังรูปที่ 5(ฉ) คู่มือการใช้งานแอพลิเคชันแสดงดังรูปที่ 5 (ช) และ (ซ) นอกจากนี้ข้อมูลรายละเอียดการใช้งานแอพลิเคชันยังสามารถเข้าดูได้ที่ http://www.view4gsignal.com:8080 อีกหนึ่งช่องทางด้วย



(ก) (ข) (ค) (ง)



(จ) (ฉ) (ช) (ซ)

รูปที่ 5 แอพลิเคชัน AR Cellular NBTC โดยที่ (ก) ไอคอนของ AR แอพ (ข) หน้าหลักของแอพ (ค) หน้าจอแสดงการทำงาน Panoramic 360 AR (ง) หน้าจอแสดงการทำงาน AR สัญญาณสุขภาพ (จ) หน้าจอแสดงฟการทำงาน AR แสดงสัญญาณเสาส่ง (ฉ) QR code ของสถานีฐานที่แสดงบนแพลตฟอร์มใช้ร่วมกับการแสดงผลแบบ Marker-based AR (ช) หน้าจอคู่มือการใช้งานในแอพ และ (ซ) หน้าจอวิธีการวัดสัญญาณ

5.3 ผลการประเมินในการเข้าร่วมโครงการฝึกอบรมการตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง

ข้อมูลจากผู้ทดสอบใช้แอพลิเคชัน AR Cellular NBTC จำนวน 50 คนซึ่งผ่านการอบรมในโครงการฯ จากจำนวนทั้งสิ้น 154 คน ใน 50 คนนี้มีผู้ตอบจำนวน 47 คน (ร้อยละ94) ที่ทราบดีว่ายิ่งอยู่ห่างจากสถานีปล่อยสัญญาณ กำลังของสัญญาณจะลดลงอย่างรวดเร็ว จึงมีผลกระทบลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน มีผู้ตอบจำนวน 42.5 คน (ร้อยละ 85) จากผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอะไรเป็นปัจจัยของกำลังสัญญาณที่มีกระทบต่อร่างกายของผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบบางส่วนอาจยังไม่แน่ใจในความเข้าใจของตนเอง เช่น ความถี่คลื่นพาห์ที่สูงขึ้น กำลังของสัญญาณจะมากขึ้น หรือกำลังของสัญญาณที่วัดได้ในปัจจุบันเป็นไปตามมาตรฐานตามที่ กสทช. กำหนดจริงหรือไม่ จากผลข้อมูลข้างต้นทำให้สรุปได้ว่า ผู้เข้าอบรมและผ่านการทดลองใช้แอพลิเคชัน AR Cellular NBTC มีความมั่นใจในความปลอดภัยในการใช้โทรศัพท์มือถือมากขึ้น อันเนื่องมาจากการใช้สื่อการอบรมเผยแพร่ข้อมูลผลการวัดจากระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และข้อมูลการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง

6. อภิปรายผล

การอภิปรายผลถูกแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อคือ 1) การอภิปรายผลการทดลองวัดสัญญาณคลื่นความถี่ภาคสนาม 2) การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลการศึกษาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ และ 3) การอภิปรายผลการใช้งานแอพลิเคชัน AR Cellular NBTC

6.1 การอภิปรายผลการทดลองวัดสัญญาณคลื่นความถี่ภาคสนาม

เครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G มีค่าความไวในการตรวจจับสัญญาณอยู่ที่ -67 dB ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจจับกำลังสัญญาณที่สูงกว่า -67 dB นอกจากนี้ กลวิธีที่ใช้เครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G วัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ 4 จุดพร้อมกันมีข้อที่ได้เปรียบกว่าการวัดที่ละจุด แต่ละจุดที่วัด ได้ผลลัพธ์คนละเวลากัน อีกทั้งข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G สามารถนำไปประมวลผลเพื่อแสดงค่า AR ได้ ในขณะที่การวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความถี่มักจะวัดได้ทีละจุด ไม่ค่อยถูกนำมาวัดพร้อมกันหลายจุด ตลอดจนการวัดเป็นเวลานานหลายชั่วโมงต่อเนื่อง เนื่องจากเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่มีราคาสูง

สถานีฐานที่ 1 2 และ 3 เป็นลักษณะบริเวณชานเมืองหรือชนบท หมายถึงสิ่งปลูกสร้างน้อย บริเวณโดยรอบเป็นพื้นที่เปิดมีอาคารกระจายอยู่ไม่หนาแน่น มีต้นไม้พุ่มไม้อยู่บ้างรอบบริเวณ ตำแหน่งเก็บสัญญาณอยู่ใต้อาคารซึ่งโปร่งไม่อับสัญญาณวิทยุการเก็บสัญญาณจากสถานีฐานที่ 1 2 และ 3 ของผู้ให้บริการ AIS TRUE และ DTAC ตามลำดับ ให้ผลการทดสอบเก็บสัญญาณด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับคลื่น 4G เทียบกับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ทั้งสามสถานีฐานและทุกแถบความถี่มีความสอดคล้องกันทั้งหมด

สถานีฐานที่ 4 5 และ 6 เป็นลักษณะบริเวณกึ่งชานเมือง โดยรอบเป็นแหล่งที่อยู่อาศัย ไม่มีอาคารสูงหรือสิ่งขวางกั้นสัญญาณ มีต้นไม้พุ่มไม้อยู่บ้าง ตำแหน่งเก็บสัญญาณอยู่บนถนนเล็ก มีรถยนต์ขนานเล็กสันจรไม่ตลอดเวลา การเก็บสัญญาณจากสถานีฐานที่ 4 5 และ 6 ของผู้ให้บริการ AIS TRUE และ DTAC ตามลำดับ ให้ผลการทดสอบเก็บสัญญาณด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับคลื่น 4G เทียบกับเครื่องวิเคราะห์ความถี่

ทั้งสามสถานีฐานและทุกแถบความถี่มีความสอดคล้องกันเกือบทั้งหมดยกเว้น สถานีฐานที่ 5 ที่ช่องสัญญาณที่ 1 ของแถบความถี่ 800 MHz ที่ตำแหน่ง 100 เมตร ที่ไม่สอดคล้องกันเพราะไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ 100 เมตรจริง

สถานีฐานที่ 7 8 และ 9 ใช้พื้นที่ของสถานีฐานและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การวัดสัญญาณ 2 บริเวณ โดยบริเวณที่ 1 ประกอบด้วยสถานีฐานที่ 7 และ 8 บริเวณที่ 2 ประกอบด้วยสถานีฐานที่ 9-1 และ 9-2

สถานีฐานที่ 7 และ 8 เป็นลักษณะบริเวณกึ่งชานเมืองมีอาคารสูงในบางทิศทาง แต่ทิศทางที่เก็บสัญญาณไม่มีอาคารสูงขวางกั้นสัญญาณ แต่มีพุ่มไม้บดบังอยู่บ้าง ตำแหน่งเก็บสัญญาณอยู่บนถนนขนาดเล็ก มีรถยนต์ขนาดเล็กสันจรบางช่วงเวลาเนื่องจากเป็นสถานที่ภายในมหาวิทยาลัย การเก็บสัญญาณจากสถานีฐานที่ 7 และ 8 ของผู้ให้บริการ AIS และ TRUE ตามลำดับ ให้ผลการทดสอบเก็บสัญญาณด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับคลื่น 4G เทียบกับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ทั้งสามสถานีฐาน สอดคล้องกันสำหรับแถบความถี่ 1800 และ 2100 MHz ของ TRUE ส่วนที่สอดคลองกันบางช่อง ได้แก่ แถบความถี่ 1800 กับ 2100 MHz ของ AIS และ 800 ของ TRUE และ สำ

สถานีฐานที่ 9-1 และ 9-2 เป็นลักษณะบริเวณกึ่งชานเมืองมีที่อยู่อาศัยมีอาคารสูง ผสมกับพื้นที่เปิดโล่ง ตำแหน่งเก็บสัญญาณอยู่บนถนนขนาดเล็ก มีรถยนต์ขนาดเล็กและใหญ่มีรถสันจรเกือบตลอดเวลา การเก็บสัญญาณจากสถานีฐานที่ 9-1 และ 9-2 สันนิฐานว่าให้บริการ AIS TRUE และ DTAC คละกัน ให้ผลการทดสอบเก็บสัญญาณด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับคลื่น 4G เทียบกับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ทั้งสามสถานีฐาน สอดคล้องกันสำหรับแถบความถี่ 900 และ 2100 MHz ของ AIS แถบความถี่ 800 900 และ 2100 MHz ของ TRUE และ แถบความถี่ 1800 2100 ของ DTAC ส่วนที่สอดคลองกันบางช่อง ได้แก่ แถบความถี่ 1800 ของ TRUE สำหรับแถบความถี่ที่ไม่สอดคล้องกัน ได้แก่ 1800 MHz ของ AIS

จากการแจกแจงผลการทดสอบเก็บค่าสัญญาณของสถานีฐานต่างๆ นั้นจะเห็นว่าถ้าสถานีฐานอยู่ในบริเวณพื้นที่เปิดโล่งค่าสัญญาณจากการเก็บค่าด้วยเครื่องต้นแบบและเครื่องวิเคราะห์ความถี่นั้นจะให้ค่าที่ตรงกัน สำหรับในพื้นที่ซึ่งมีสิ่งปลูกสร้างหรือมีสิ่งกีดขวางสัญญาณหรือรบกวนสัญญาณจากสถานีฐานจะทำให้สัญญาณที่เก็บได้จากทั้งสองอุปกรณ์ไม่ตรงกันได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการทดลองการวัดสัญญาณคลื่นความถี่ภาคสนามเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องต้นแบบตรวจจับคลื่น 4G และ SA มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าที่ได้ยังมีผลที่แตกต่างกันอันอาจมาจากสาเหตุ 3 ประการ

1. ตำแหน่งที่ติดตั้งทดสอบเครื่องต้นแบบและเครื่องวิเคราะห์ความถี่อาจไม่อยู่ใน ตำแหน่งเดียวกันหรือห่างกันออกไป อาจอยู่ในตำแหน่งรับสัญญาณไม่เหมือนกัน ซึ่งอาจมีคลื่นสะท้อนหรืออาจหรือถูกบดบังสัญญาณทำให้สัญญาณต่างกันได้ ส่งผลให้ขณะใช้งานคุณสมบัติการรับสัญญาณสามารถผกพันได้เมื่ออยู่ใกล้กับวัสดุแวดล้อมอื่น

2. อุปกรณ์ที่ใช้เก็บค่าสัญญาณอาจไม่เหมือนกันทุกตัวเช่นสายอากาศ สายอากาศที่ใช้บางตัวอาจทำงานได้ไม่ดีในบางช่องความถี่ สายอากาศที่ใช้ในงานวิจัยเป็นสายอากาศราคาประหยัดไม่ได้มีการรับรองมาตรฐานชัดเจนซึ่งอาจส่งผลให้เสถียรภาพในการตรวจจับสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศมาตรฐาน เช่น สายอากาศแบบ Triaxial Isotropic Antenna ดังแสดงใน Keysight (2021) ซึ่งมีราคาที่สูงกว่าหลายเท่าตัว

3. ลักษณะการตรวจจับสัญญาณของเครื่องต้นแบบตรวจจับคลื่น 4G ทำงานต่อเนื่องตั้งแต่เวลา 9.00 – 21.00 น. อีกทั้งในบางจุดวัดต้องทำงานที่อยู่กลางแจ้งซึ่งถ้ามีอุณหภูมิสูง (Thermal noise) ขึ้นมากก็เป็นสาเหตุให้เป็นค่าสัญญาณต่างไปจากที่ควรจะเป็น ในขณะที่ SA จะมีการวัดเป็นช่วงเวลาซึ่งได้มีการพักการใช้งาน

6.2 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลการศึกษาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลการศึกษาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ได้นำเอาแนวทาง การดำเนินงานของระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ของประเทศสาธารณาเกาหลีใต้ (C. Kim, 2008) สาธารณรัฐประชาชนจีน (D. Chen, 2012) สหรัฐอเมริกา (P. Karimi, 2018) แนวทางการดำเนินงานตรวจสอบคลื่นความถี่ของหน่วยงาน กสทช. ที่กำกับดูแลผู้ประกอบการให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่และการคุ้มครองผู้ใช้บริการด้าน EMF (บวร มากนาคา, 2564) และโครงงานวิจัย (รายงานฉบับสมบูรณ์, 2565) ในประเด็นดังนี้

กลวิธีการวัดที่ครอบคลุมหรือรองรับการเฝ้าดูการครอบครองคลื่นความถี่ กลวิธีการวัดครอบคลุมหรือรองรับการเฝ้าดูการครอบครองคลื่นความถี่ การแสดงผลกำลังสัญญาณคลื่นความถี่ด้วยนวัตกรรมใหม่ เช่น AR การรายงานผลระดับกำลังสัญญาณที่วัดได้มีระดับสัญญาณที่ปลอดภัยเมื่อเทียบค่าเกณฑ์มาตรฐานที่อาจอันตรายต่อสุขภาพ เช่น ค่ามาตรฐานของ SAR กลวิธีการวัดเป็นไปตามมาตรฐานรายงานในเอกสาร ICNIRP

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลการศึกษาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่

หัวข้อ/เรื่อง/ประเด็น ที่นำเสนอ	ผลการศึกษาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่				
ประเทศ	เกาหลีใต้	จีน	สหรัฐอเมริกา	ไทย	ไทย
ผู้แต่ง/นักวิจัย/วิทยากร/แหล่งที่มา	C. Kim (2008)	D. Chen (2012)	P. Karimi (2018)	บวร มากนาคา (2564)	รายงานฉบับสมบูรณ์ (2565)
กลวิธีการวัดครอบคลุมหรือรองรับการเฝ้าดูการครอบครองคลื่นความถี่	✓	✓	✓	✗	✓
การแสดงผลกำลังสัญญาณคลื่นความถี่ด้วยนวัตกรรมใหม่ เช่น AR	✗	✗	✗	✗	✓
การรายงานผลระดับกำลังสัญญาณที่วัดได้มีระดับสัญญาณที่ปลอดภัยเมื่อเทียบค่าเกณฑ์มาตรฐานที่อาจอันตรายต่อสุขภาพ เช่น ค่ามาตรฐานของ SAR	N/A	N/A	N/A	✓	✓
กลวิธีการวัดเป็นไปตามมาตรฐานรายงานในเอกสาร ICNIRP โดยเวลาที่ใช้ในการวัดสัญญาณที่ปล่อยจากสถานีฐานใช้ในเวลา 6 นาทีต่อจุดที่วัด	✓	✓	✓	✓	✓
กลวิธีการวัดจะมีจุดวัดที่ห่างออกจากสถานีฐานเป็นในสัดส่วนที่เท่ากัน โดยมีรัศมีไม่เกิน 500 เมตร	N/A	N/A	N/A	✓	✓
กลวิธีการวัดรองรับการวัดหลายจุดพร้อมกันในจุดวัดที่ห่างออกไปจากบริเวณสถานีฐาน	✓	✓	✓	✗	✓

โดยเวลาที่ใช้ในการวัดสัญญาณที่ปล่อยจากสถานีฐานใช้ในเวลา 6 นาทีต่อจุดที่วัด กลวิธีการวัดจะมีจุดวัดที่ห่างออกจากสถานีฐานเป็นในสัดส่วนที่เท่ากัน โดยมีรัศมีไม่เกิน 500 เมตร และ กลวิธีการวัดรองรับการวัดหลายจุดพร้อมกันในจุดวัดที่ห่างออกไปจากบริเวณสถานีฐาน โดยได้สรุปการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลการศึกษาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ในตารางที่ 2 โดยสัญลักษณ์ ✓ หมายถึงมีหรือรองรับกับ หัวข้อ/เรื่อง/ประเด็นที่นำเสนอ ✗ หมายถึงไม่มีหรือไม่รองรับ และ N/A คือไม่ปรากฏในรายงาน

6.3 การอภิปรายผลการใช้งานแอพลิเคชัน AR Cellular NBTC

ข้อมูลจากผู้ทดสอบใช้แอพลิเคชัน AR Cellular NBTC จำนวน 50 คนซึ่งผ่านการอบรมในโครงการฯ จากจำนวนทั้งสิ้น 154 คน ใน 50 คนนี้ผู้ทดสอบส่วนใหญ่มีความเห็นตรงกันว่าเทคโนโลยี AR มาแสดงผลเป็นรูป Bubble ที่มีขนาดหรือสีที่แตกต่างกันช่วยทำให้มีความสนใจและเข้าใจผลจากการวัดสัญญาณได้ง่ายขึ้น จำนวน 48 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 96 นอกจากนี้ในแบบสอบถามยังมีอีก 2 หัวข้อ โดย

หัวข้อที่ 1 เป็นความพึงพอใจในการใช้งานแอพพลิเคชั่น ข้อคิดเห็นที่ 1 ใช้ง่ายเพราะฟังก์ชันต่างๆ ใช้งานได้ง่าย ข้อคิดเห็นที่ 2 ใช้ง่ายแต่ AR มีขนาดใหญ่แต่ตัวอักษรเล็ก ถ้าปรับให้เหมาะสม จะทำให้การดูสะดวกขึ้น ข้อคิดเห็นที่ 3 ใช้งานง่ายมาก เป็นแอพพลิเคชั่นที่ดี และข้อคิดเห็นที่ 4 ไม่ เด้งหลุดบ่อย ไม่แน่ใจว่าเกิดสาเหตุใด

หัวข้อที่ 2 ข้อเสนอแนะการปรับปรุงแอพพลิเคชั่น ข้อเสนอแนะที่ 1 ลักษณะเมนูที่เข้าใจง่ายกว่านี้ และเทมเพลตที่ดูสวยน่าสนใจ ข้อเสนอแนะที่ 2 ควรทำให้แอพมีความสดใสน่าใช้งานมากกว่านี้ ข้อเสนอแนะที่ 3 การเก็บผลส่วนบุคคล และขนาดของบอล AR ตอนดูใช้งาน และสามารถ share ผลให้เพื่อนๆ ดูได้ ข้อเสนอแนะที่ 4 การหมุนรอบๆ เพราะถ้าดูครบทุกฟังก์ชันในครั้งเดียวอาจจะเกิดการเวียนหัว ข้อเสนอแนะที่ 5 อยากให้ใช้งานง่ายกว่านี้ไว้เผื่อสำหรับเด็กและผู้สูงวัย ข้อเสนอแนะที่ 6 ปรับปรุงเพิ่มฟีเจอร์ต่างๆ ให้ใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นและปรับ UI/UX ให้มีภาพลักษณ์ให้ดูสวยขึ้น ข้อเสนอแนะที่ 7 เด้งหลุด ค้าง ความเสถียรภาพของสัญญาณ ข้อเสนอแนะที่ 8 ปรับปรุงด้านหน้าตาโปรแกรม ไอคอน ต่างๆ และ ข้อเสนอแนะที่ 9 โดยรวมแอพใช้งานง่าย ไม่มีปัญหาอะไร ใช้งานได้ดี

7. บทสรุป

การดำเนินงานในโครงการ ระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ สามารถให้ข้อมูลการวิเคราะห์และอภิปรายแนวทางการดำเนินงานของระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ของต่างประเทศจำนวน 3 ประเทศประกอบด้วยสาธารณรัฐเกาหลี สาธารณรัฐประชาชนจีน และ สหรัฐอเมริกา และเสนอแนวทางการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สามารถนำมาประยุกต์เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ให้เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยในปัจจุบัน สามารถสร้างต้นแบบเครื่องตรวจสอบความถี่แบบพกพาพร้อมนำเอาเทคโนโลยี AR มาประยุกต์เพื่อใช้แสดงผลที่ได้จากการตรวจจับคลื่นความถี่แบบเสมือนจริงที่แสดงผล AR แบบใช้ควบคู่กับเครื่องหมายระบุตำแหน่ง และ AR แบบหมุนได้รอบทิศทาง สามารถสร้างสื่อการเรียนรู้เกี่ยวกับระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ รวมถึงรายละเอียดของเครื่องมือตรวจสอบคลื่นความถี่ สามารถถ่ายทอดองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นให้กับประชาชน นักเรียน นักศึกษา และผู้สนใจ

ทั่วไปผ่านการเข้าร่วมการอบรมสัมมนาเชิงปฏิบัติการซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 154 คน และผู้เข้าอบรมสามารถประเมินผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเสาปล่อยสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ในเบื้องต้นได้

8.ข้อเสนอแนะ

8.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ผลการวิจัยของทั้ง 3 ประเทศอันประกอบด้วยสาธารณารัฐประชาชนจีน สาธารณรัฐเกาหลีใต้ และสหรัฐอเมริกาสะท้อนปัญหาประสิทธิภาพการจัดสรรคลื่นความถี่แบบกำหนดตายตัว และเสนอแนวคิดการจัดสรรคลื่นแบบพลวัต ดังนั้นการสร้างความร่วมมือระหว่าง กสทช และ มหาวิทยาลัยบูรพา มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เพื่อขยายเชิงพื้นที่ครอบคลุมภายในประเทศและประเทศเพื่อนบ้านในเขตอาเซียนและรวมทั้งพัฒนาชุดตรวจสอบคลื่นความถี่ HACK RF และพัฒนาระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ให้เป็นไปในลักษณะระบบ Cognitive Radio และ ระบบ SCADA สำหรับการมอนิเตอร์คลื่นความถี่

8.2 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับกิจการสื่อสาร

ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับกิจการสื่อสารแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) นโยบายการบริหารจัดการคลื่น และ 2) แนวทางในการพัฒนาบุคลากรและระบบการตรวจสอบคลื่นความถี่

8.2.1 นโยบายการบริหารจัดการคลื่นความถี่จำเป็นต้องวางแผน จัดสรร และการกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อประเทศชาติและประชาชนให้ปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกัน ในการบริหารจัดการเพื่อให้เกิดการแข่งขันที่เสรีและเป็นธรรม การมีส่วนร่วมของ Third Party เฝ้าสังเกตการวัดประสิทธิภาพการใช้งานคลื่นความถี่ ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่ควรสนับสนุนให้เกิดขึ้น ตลอดจนการสร้างระบบ Cognitive Radio และระบบ SCADA สำหรับการมอนิเตอร์คลื่นความถี่ให้ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย

8.2.2 แนวทางในการพัฒนาบุคลากรและระบบการตรวจสอบคลื่นความถี่สามารถแบ่งเป็น 3 ข้อดังนี้

8.2.2.1 การพัฒนาบุคลากรให้มีความรู้ในการติดตั้งเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G โดยลำดับแรกต้องมีการสำรวจคลื่นความถี่บริเวณสถานีฐานมีช่องสัญญาณใดบ้าง กำหนดช่องสัญญาณที่ต้องการวัด เช่น ต้องการวัดเฉพาะช่องสัญญาณที่ 1 – 6 จากทั้งหมด 36 ช่องสัญญาณ ให้กำหนดสำหรับเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G ในแต่ละรอบการวัด ๆ เฉพาะช่องสัญญาณที่ 1 - 6 เท่านั้น การกำหนดดังกล่าว ทำให้แต่ละรอบการวัดใช้เวลาการสแกนตั้งแต่ช่องสัญญาณที่ 1 - 6 และวนกลับมาที่เริ่มที่ช่อง 1 - 6 ต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามหากไม่ต้องการกำหนดช่องสัญญาณการวัดแต่ละครั้งก่อนการวัด ค่าตั้งต้นสำหรับกำหนดให้สแกนช่องสัญญาณจะเริ่มตั้งแต่ช่องที่ 1 – 36 ซึ่งจะใช้เวลาสแกนนานขึ้นกว่าจะกลับมาเริ่มช่องสัญญาณที่ 1 - 36

8.2.2.2 การพัฒนาบุคลากรให้มีความรู้ในการเพิ่มจำนวนสถานีฐานลงบนฐานข้อมูลที่รับค่ามาจากเครื่องต้นแบบตรวจจับสัญญาณ 4G ต้องมีป้อนตำแหน่งพิกัดของสถานีฐานว่ามีตำแหน่ง lat long ลงบนฐานข้อมูล

8.2.2.3 การพัฒนาบุคลากรให้มีความรู้เกี่ยวกับการใช้งานแอพลิเคชัน AR Cellular NBTC บนสมาร์ทโฟนเพื่อแสดงผลคลื่นในรูปแบบ AR จะต้องใช้ทรัพยากรของเครื่องโทรศัพท์มือถือค่อนข้างสูง และการแสดงผลลัพธ์ปริมาณมากจะทำให้ภาพเต็มหน้าจอ บดบังส่วนอื่น ๆ ของหน้าจอได้ ดังนั้น ควรมีการกดปุ่ม “เคลียร์หน้าจอ” เป็นระยะ ๆ เพื่อทำการลบภาพเก่าที่ไม่จำเป็นทิ้งไปและแสดงค่าคลื่นที่เป็นปัจจุบันในรูปแบบ AR บนหน้าจอได้

9.กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) สำนักงาน กสทช. สัญญารับทุน เลขที่ B62 - 1 - (2) – 002 และขอขอบพระคุณนายอุบล ดีเสียง ผู้อำนวยการส่วนผู้บริโภคและประโยชน์สาธารณะ สำนักงาน กสทช. ภาค 1 วิทยากรรับเชิญบรรยายในหัวข้อการบริหารจัดการเรื่องร้องเรียนเกี่ยวกับเสาส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่และความปลอดภัยต่อสุขภาพมนุษย์ และนายบวร มากนาคา ผู้อำนวยการส่วนมาตรฐานโทรคมนาคม สำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม สำนักงาน กสทช. วิทยากรรับเชิญบรรยายในหัวข้อ นโยบายการกำกับดูแลผู้ประกอบการให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่และการคุ้มครองผู้ใช้บริการด้าน EMF ในโครงการฝึกอบรมการตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง เมื่อวันที่ 2 ธันวาคม 2564

รายการเอกสารอ้างอิง

รายงานฉบับสมบูรณ์ (2565) โครงการระบบตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง

บวร มากนาคา (2564) บรรยายพิเศษในหัวข้อ “นโยบายการกำกับดูแลผู้ประกอบการให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่และการคุ้มครองผู้ใช้บริการด้าน EMF” ในโครงการฝึกอบรมการตรวจสอบคลื่นความถี่และการแสดงผลด้วยเทคโนโลยีมิติเสมือนจริง เมื่อวันที่ 2 ธันวาคม 2564

C. Kim, C. Leem, S. Kang and J. Lee, (2008). "Policy and Technology of Dynamic Spectrum Access in Korea," 2008 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008), 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/CROWNCOM.2008.4562456.

D. Chen, J. Yang, J. Wu, H. Tang and M. Huang, (2012) "Spectrum occupancy analysis based on radio monitoring network," *2012 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC)*, 2012, pp. 739-744, doi: 10.1109/ICCChina.2012.6356981.

Keysight (2021) “Electromagnetic Field (EMF) Triaxial Isotropic Antenna” Retrieved from https://www.keysight.com/us/en/assets/3121-1035/data-sheets/Electromagnetic-Field-EMF-Triaxial-Isotropic-Antenna.pdf

M. Höyhtyä *et al*., (2016) "Spectrum Occupancy Measurements: A Survey and Use of Interference Maps," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2386-2414, Fourthquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2559525.

P. Karimi, W. Lehr, I. Seskar and D. Raychaudhuri,(2018) "SMAP: A Scalable and Distributed Architecture for Dynamic Spectrum Management," 2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2018, pp. 1-10, doi: 10.1109/DySPAN.2018.8610416.